

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки  
Кафедра електронних приладів та пристроїв**

**До захисту допущено**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ Л.Д. Писаренко

«\_\_» червня 2019 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки **6.050802 – Електронні пристрої та системи**

на тему « **П'єзоелектричні пристрої на плівках A2B6** »

**Виконав:**

Студент 3 курсу, гр. ДЕ-пб1

**Калачников Олександр  
Олександрович**

\_\_\_\_\_

**Керівник:**

Старший викладач ЕП та П, к.т.н.

**Семікіна Т.В.**

\_\_\_\_\_

**Нормоконтроль:**

Доцент кафедри ЕП та П, к.т.н.

**Чадюк В.О.**

\_\_\_\_\_

**Рецензент:**

к.ф.-м.н., с.н.с.

**Мамикін С.В.**

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій бакалаврській роботі  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ-2019

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки

Кафедра електронних приладів та пристроїв

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки (програма професійного спрямування) – 6.050802 –

Електронні пристрої та системи (Електронні прилади та пристрої)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри, проф., д.т.н.

\_\_\_\_\_ Л.Д.Писаренко

« \_\_\_\_ » червня 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

на дипломну роботу студенту

**Калачникову Олександр Олександровичу**

**1. Тема роботи « П'єзоелектричні пристрої на плівках А2В6 »**

і керівник роботи Семікіна Тетяна Вікторівна, старший викладач, к.т.н.

затверджені наказом по університету від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р., № 1404-с

**2. Термін подання студентом роботи : « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.**

**3. Вихідні дані до роботи:** Розробка методики вимірювання характеристик тонких п'єзоелектричних плівок, інженерний процес вирощування тонкоплівкових гетероструктур, інженерний розрахунок еквівалентної схеми на основі матеріалів групи А2В6.

**4. Зміст роботи:** Анотація; вступ; огляд науково-технічної літератури по п'єзоефекту, п'єзоелектричним перетворювачам; методика розрахунку еквівалентних схем; інженерний розрахунок амплітудно - частотних характеристик п'єзоелектричних плівок; список науково-технічної літератури.

**5. Перелік ілюстративного матеріалу:** схематичні зображення, функціональні та конструкторсько-технологічні схеми, структурні схеми; плакат з складальним кресленням.

**6. Дата видачі завдання : \_\_\_\_\_ 2019 р.**

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд науково-технічної літератури на тему п'єзоелектричного ефекту, приладів та матеріалів.	20.03.2019	
2	Огляд методів дослідження п'єзоелектричних датчиків.	05.04.2019	
3	Вирощування тонкої п'єзоплівки. Технологія отримання плівок А2В6 типу.	20.04.2019	
3	Дослідження амплітудно- частотних характеристик за допомогою приладу «ОБЗОР-103».	05.05.2019	
4	Дослідження параметрів та характеристик виготовленої п'єзоплівки.	20.05.2019	
5	Використання плівки А2В6 типу у коаксіальних лініях навантаження	05.06.2019	
6	Оформлення графічної частини, пояснювальної записки, плакатів, підготовка доповіді.	15.06.2019	

Студент гр. ДЕп-61

О.О. Калачников

Керівник роботи

Т.В. Семікіна

## **РЕФЕРАТ**

**П'єзоелектричні пристрої на плівках A2B6** / Бакалаврська робота напряму підготовки **6.050802 – «Електронні пристрої та системи»** спеціалізації

**«Електронні прилади та пристрої». Калачников Олександр**

**Олександрович.** НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського». Факультет електроніки, кафедра електронних приладів та пристроїв. Група ДЕп-61. – К.: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2019. – 62 с., іл. 15, табл. 7.

**Ключові слова:** ПЕ – п'єзоефект, ПКМ – п'єзокерамічні матеріали, ПП - п'єзоперетворювач, ПК - п'єзокераміка, ЦТС – цирконат-титанат свинцю, п'єзоплівка, коефіцієнт електромехнічного зв'язку, вектор поляризації.

**Короткий зміст роботи:** Дана дипломна робота присвячена дослідженню п'єзоплівки на основі матеріалів групи A2B6, в ній представлено результати інженерних, експериментально отриманих параметрів та характеристик п'єзоплівки, використовуваних в коаксіальних системах збудження.

У вступі сформульована головна задача роботи і показана її актуальність. В аналізі літератури представлений огляд науково-технічної інформації по основам п'єзоефекту, матеріалам та класифікацією ПКМ. Приведені унікальні властивості п'єзоплівки та важливі характеристики. Окремо виділено плівки групи A2B6 та їх застосування. Розкрито тему п'єзодатчиків, їх класифікація та основні характеристики. Сформульовані переваги та недоліки п'єзодатчиків на основі п'єзоелектричних плівок. Проведений аналіз методів підвищення чутливості п'єзоелектричних датчиків. В теоретичній частині приведені основні існуючі види матеріалів, що володіють явищем п'єзоефекту, та принципи їх роботи.

Важливу роль у роботі відведено на виготовлення п'єзоелектричної плівки групи A2B6. Описана детальна технологія та температурний графік,

який супроводжує увесь процес виготовлення. Показаний процес розробки поетапно з супроводжуючими рисунками.

Описані прилади за допомогою яких були отримані результати вимірювань та дані, на яких будувався подальший розрахунок. Одним з них став векторний аналізатор ланцюгів «ОБЗОР-103» про який детально було описано у роботі та приведені приклади вихідних даних, його область застосування і параметри, з якими він може працювати.

В конструктивно-технологічному та експериментальному розділах приведений детальний опис практичних досліджень та результати досліджуваних параметрів та характеристик системи, підтверджена перспективність їх розробки. А саме, описана еквівалентна схема розрахунку характеристик п'єзоплівки у вигляді паралельного коливального контуру. Обґрунтовано необхідність використання цієї схеми. Розроблена методика вимірювань показує тісний взаємозв'язок вимірюваних амплітудо-частотних характеристик з результатами розрахунку еквівалентної схеми. Отримані дані були порівняні з виміряними за допомогою приладу «Измеритель иммитанса Е7-20». Характеристики приладу, його вимірювані параметри та області застосування також присутні у даній роботі.

Сформульовано використання п'єзоперетворювача у коаксіальних лініях навантаження, описана конструктивна доцільність використання п'єзоплівки, її перевага перед п'єзокерамікою. Також приведено саму конструкцію приладу у разі використання нового елемента.

## АНОТАЦІЯ

Дана дипломна робота присвячена дослідженню та розробці власної методики розрахунку на основі тонких плівок  $A2B6$ , в ній представлені результати інженерно-практичних досліджень та розрахунків амплітудно-частотних характеристик при змінному прикладеному тиску.

Робота складається із вступу, аналізу літератури, теоретичної частини, інженерних розрахунків та висновків. У вступі сформульована головна задача роботи і показана її актуальність. В аналізі літератури представлений огляд науково-технічної інформації по основам п'єзоефекту, матеріалам та класифікацією ПКМ, основні параметри та характеристики п'єзоелектриків, та підтверджена перспективність їх розробки. В теоретичній частині приведені основні існуючі види матеріалів, що володіють явищем п'єзоефекту, та принципи їх роботи. В експериментальному розділі приведений детальний опис практичних досліджень та результати аналізу досліджуваних параметрів та характеристик системи.

## S U M M A R Y

This graduate work is dedicated to the research and development of its own method of calculation on the basis of thin films  $A2B6$ , it presents the results of engineering and practical studies and calculations of amplitude-frequency characteristics with variable applied pressure.

The work consists of the introduction, analysis of literature, theoretical part, engineering calculations and conclusions. The introduction formulated the main task of the work and shown its relevance. The analysis of literature presents an overview of scientific and technical information on the basics of piezoelectricity, materials and classification of PCM, the main parameters and characteristics of piezoelectrics, and the promise of their development is confirmed. In the theoretical part are given the main existing types of materials that have the phenomenon of piezoelectric effect, and the principles of their work. The experimental section gives a detailed description of the practical research and the results of the analysis of the studied parameters and characteristics of the system.

## Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ .....	9
Вступ.....	10
1.Огляд .....	11
1.1. П'єзоелектричні прилади.....	11
1.1.1. Основи п'єзоефекту.....	11
1.1.2. П'єзоелектричні матеріали.....	12
1.2. П'єзоелектричні плівки .....	17
1.3. П'єзодатчики.....	22
1.3.1. Класифікація п'єзодатчиків.....	23
1.3.2. Підвищення чутливості п'єзоелектричних датчиків.....	24
Висновки: .....	28
2. Методи дослідження п'єзоелектричних датчиків .....	29
2.1. Рівняння стану п'єзоелектрика .....	30
2.2. Коефіцієнт електромеханічного зв'язу.....	32
2.3. Рівняння Максвелла .....	33
Висновки: .....	34
3. Експериментальна частина. ....	35
3.1. Технологія отримання плівок А2В6.....	35
3.2. Дослідження властивостей п'єзоплівки методом амплітудно-частотних характеристик за допомогою приладу «ОБЗОР-103». ....	39
3.3. Моделювання п'єзоелементу за допомогою коливального контуру....	43
Висновки .....	48

					БР.171.061.003 ПЗ					
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						
Розроб.		Калачников О.О			П'єзоелектричні пристрої на плівках А2В6			Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.									7	62
Реценз.		Семікіна Т.В.		КПІ ім. І. Сікорського						
Н. Контр.		Мамикін С.В								
Затверд.		Пусаренко Л.Д.								

4.Розрахункова частина .....	49
Висновки .....	54
5. Приклад застосування п'єзоперетворювача з плівкою CdS у коаксіальних лініях навантаження.....	55
Висновки .....	58
Висновок .....	59
Перелік використаної науково-технічної літератури: .....	60

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.м.	Підпис	Дата		8



# ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

ПКМ –	п'єзокерамічні матеріали
ЦТС –	цирконат-титанат свинцю
ТБ –	титанат - барію
ТЗ –	титанат - свинцю
ЦТ –	титанат цирконію
ЦТБС –	цирконат — титанату барія свинцю
ЦТСЛ –	цирконат-титанат свинцю модифікований лантаном
ПВДФ –	полівініленденфторід
$S_q$ –	чутливість по заряду
$\Delta\omega$ –	ширина резонансної кривої
$\omega_p$ –	частота резонансу
$Q$ –	добротність
$C^T$ –	ємність п'єзоелектрика на малій частоті
$C_0$ –	електрична ємність
$k_e$ –	коефіцієнт електромеханічного зв'язку
$\varepsilon$ –	діелектрична проникність
$\omega_a$ –	частота антирезонансу

## Вступ

Сучасний науково-технічний прогрес нерозривно пов'язаний з розробкою і освоєнням нових матеріалів. Матеріал – один із найбільш визначних рішень інженерів під час розробки складної апаратури. На даний момент існує декілька тисяч найменувань матеріалів, що використовується в техніці. У теперішній час інженери мають задачі, у котрих вже наперед задані характеристики, що ускладнює процес розробки виробів. Основною проблемою в розвитку усіх напрямів техніки залишається зменшення собівартості приладу, його мініатюризація, менше енергоспоживання та підвищення якості і надійності.

На сьогоднішній день, роль матеріалу у техніці відіграє надзвичайну велику роль. Саме матеріали використовуються в якості класифікації багатьох систем та приладів. Актуальним залишається питання використання матеріалів з потрібними властивостями у певних областях електроніки.

В даній роботі ставилась задача дослідити властивості та характеристики тонких плівок A2B6 типу. Вибір саме цієї групи був обумовлений декількома причинами. По-перше, в інституті фізики напівпровідників НАНУ існує технологічне обладнання для вирощування цих плівок. По-друге, на цих плівках можна зробити прилади, які працюють на акустичних хвилях і дослідити їх роботу. Отже, наступна задача, яка була дана у роботі – розробка методики вимірювання характеристик п'єзоплівок. Експериментальна частина роботи присвячена отриманню плівок на спеціальному обладнанні з подальшим оглядом приладу, на якому буде проводитись вимірювання амплітудно- частотної характеристики. У розрахунковій частині був проведений аналіз еквівалентної схеми вимірювання характеристик п'єзоплівки та оцінка результатів. У роботі описане використання тонкої плівки A2B6 типу у якості заміни елемента в коаксіально збуджуючій системі.

					БР.171.061.003 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ локум.	Пілпис	Дата		10

# 1. Огляд

## 1.1 П'єзоелектричні прилади

### 1.1.1 Основи п'єзоефекту

Принцип дії п'єзоелектричних датчиків заснований на використанні прямого або зворотнього п'єзоелектричних ефектів.

Сутність прямого п'єзоелектричного ефекту полягає в електричній поляризації певного класу діелектриків, званих п'єзоелектриками (сегнетоелектриками, фероелектриками), при механічному напрузі в їх матеріалі [1].

Зворотній п'єзоелектричний ефект характеризується тим, що електрична поляризація викликає механічне напруження в п'єзоматеріалах або зміна геометричних розмірів п'єзоелементів.

Інакше можна сказати, що прямий п'єзоелектричний ефект полягає у створенні електричних зарядів в п'єзоелектричному матеріалі при впливу на нього механічної сили, а зворотний п'єзоефект - у виникненні коливань при підключенні п'єзоелемента до джерела електричної напруги [1].

Особливістю п'єзоелектричного ефекту є знакочутливість, тобто зміна знаку заряду при переході від стиснення кристала до розтягування і зміна знаку деформації, при зміні напрямку поляризованого поля.

### 1.1.2 П'єзоелектричні матеріали

З п'єзоелектричних матеріалів виготовляють п'єзоелементи, які є чутливими елементами датчиків. П'єзоелемент - це виріб з п'єзоелектричного матеріалу з металевими електродами, нанесеними на його поверхню (рис. 1) [1]. Як п'єзоелектричні матеріали вони використовуються у:

- монокристалічних матеріалах (кварц, ніобат літію, сегнетова сіль та ін.);
- полікристалічних матеріалах (п'єзокераміка).

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ докум.	Підпис	Дата		11



Рис.1 П'єзокерамічні елементи

Перевагою кварцу є стійкість до впливу температури і вологості, механічна міцність. Кварц має незначний коефіцієнт лінійного розширення, його п'єзомодуль практично не залежить від температури до  $200^{\circ}\text{C}$ , а в діапазоні  $200 \dots 500^{\circ}\text{C}$  змінюється незначно, питомий електричний опір - близько  $10^{16}\text{ Ом / м}$ , однак він сильно залежить від температури і має неоднакове значення в напрямку різних осей.

Значення п'єзомодулей кварцу  $d_{ij}(10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}})$  наступні:  $d_{21} = -d_{11} = 2,31$ ;  $d_{25} = -d_{14} = 4,26$ , а інші п'єзомодулі рівні нулю.

Основу більшості сучасних ПКМ складають тверді розчини титану-цирконату свинцю (ЦТС, PZT), модифіковані різними компонентами і добавками. Випускаються також ПКМ на основі титанату барію (ТБ), титанату свинцю (ТЗ), ніобату свинцю (НС), титанату вісмуту (ТВ) і ін [2]. Основними властивостями ПКМ, що проявляються на стандартних керамічних зразках, є:

- високі значення діелектричної проникності;
- наявність спонтанної поляризації окремих областей (доменів);
- наявність петель гістерезису на поляризаційно-електричному полі та деформаційно-електричному полі;

					БР.171.061.003 ПЗ	Арк
						12
ЗМН	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

- зростання діелектричної проникності з підвищенням температури;
- наявність особливої точки (температура Кюрі) на кривій залежності діелектричної проникності від температури, вище якої сегнетоелектричні властивості не проявляються;
- виникнення залишкової поляризації та подвійного електричного шару на поверхні зроблених зразків після впливу постійного електричного поля, яка обумовлює можливість прояву тілом п'єзоелектричного ефекту (перетворення механічної енергії в електричну і / або навпаки).

					БР.171.061.003 ПЗ	Арк.
						13
Змн	Арк	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця 1. Параметри п'єзокерамічних матеріалів

Матеріал	Коеф. Електроме х. Зв'язку	Відносна діел.про никність	Щільність	П'єзомодулі				Чутливість у режимі прийому				Відносне відхилення частоти у інтервалі температур -60 - +85 С	Тангенс діел.втрат		Водопогли нання	Модул ь Юнга	Електрич на стійкість	Темпера тура точки Кюрі	Швид кість звуку	Механіч на добротні сть
													Слабке поле	Сильне поле						
ЦТС - 19	0,6	1750	7,5	160	330	400		10,4	21,4	30,6	0,8	2,8	-		0,2	0,7	3,0	300	3,0	80
ЦТС- 19(ЦТ)	0,65	2200	7,5	210	430	-		10,7	22	-	-	2,0	-		-	-	-	300	2,6	60
ЦТС-21	0,3	500	7,6	40	100	120		9,1	22,6	-	1,5	2,0	-		0,2	0,9	4,0	400	3,7	150
ЦТС-23	0,5	1000	7,5	120	240	365		13,6	27,1	-	-	0,7	3,0		0,09	0,75	3,0	280	3,3	300
ЦТС-26	0,62	1750	7,6	160	330	400		10,4	21,4	-	1,0	2,0	-		-	-	-	350	3,0	80
ЦТС- 26М	0,62	1750	7,6	160	330	-		10,4	21,4	-	-	2,0	-		-	-	-	350	3,0	80
ЦТС-35	0,45	1000	7,5	100	200	-		-	-	-	0,4	2,0	-		0,2	0,75	1	300	3,45	700
ЦТС- 35У	0,48	800	7,5	85	190	-		-	-	-	-	2,5	-		-	-	-	290	3,5	650
ЦТС-36	0,57	670	7,7	90	220	440		15,4	38	-	3,0	3,0	-		-	-	-	350	3,3	80
ЦТС-38	0,3	460	7,5	40	70	-		-	-	-	0,2	1,0	-		-	-	-	330	3,5	1700
ЦТС-39	0,38	720	7,5	60	100	-		-	-	-	0,25	1,0	-		-	-	-	290	3,5	1150
ЦТС-40	0,48	1350	7,5	80	150	-		-	-	-	0,4	1,0	-		-	-	-	240	3,45	600
ЦТССг-3	-	1400	7,4	130	275	-		10,5	22,2	-	-	-	-		0,15	-	-	-	-	900
ЦТССг- 3(тп)	0,55	1400	7,7	140	260	-		11,3	21	-	-	0,7	3,0		-	-	-	280	3,0	300
ЦТБС-3	0,45	2300	7,25	134	286	-		7,8	16	23,8	-	1,2	3,5		0,1	≥0,7	3,0	180	3,5	200
ЦТБС-7	0,54	1600	7,5	140	330	575		9,6	23,1	-	-	0,8	3,5		-	-	-	220	3,3	300
НЦТС-2	0,65	5700	7,8	310	650	-		7,9	12,9	-	-	3,0	-		-	-	-	140	2,6	50
ТНвВ-1	-	140	6,9	-	16	-		-	12,9	-	-	0,5	-		-	-	-	660	-	4000
ТНвВ-1м	-	130	6,6	-	22	-		-	19,2	-	-	0,8	-		-	-	-	630	-	-
ТНВ-1	-	100	7,2	-	7	-		-	7,9	-	-	0,8	-		-	-	-	920	-	-

Залежно від основного призначення ПКМ поділяються наступним чином :

1. «Сегнетом'які» ПКМ. Вони використовуються для виготовлення високочутливих перетворювачів, які працюють без жорстких вимог до стабільності параметрів проти дестабілізуючих факторів (підвищені температури, електричні та механічні поля) [1].

ПКМ загального призначення. До них відносяться матеріали ЦТС-19 і ЦТС-19 (ЦТ). ЦТС-19 (ЦТ) є модифікацією ЦТС-19 з підвищеними (рекордними для даного матеріалу) значеннями п'єзоелектричних модулів ( $d_{ik}$ ).

Спеціальний ПКМ зі зниженою діелектричною проникністю і високою чутливістю в режимі прийому. До них відноситься матеріал ЦТС-36, який зазвичай виготовляється у вигляді гарячо пресованих блоків і призначений, зокрема, для виробництва перетворювачів для ультразвукових ліній затримки.

ПКМ спеціального призначення з підвищеними значеннями діелектричної проникності і п'єзомодулем. До них відноситься матеріал НЦТС-2. Ці матеріали призначені для використання у телефонних пристроях з підвищеною чутливістю.

2. «Сегнетожорсткі» ПКМ. Застосовуються для виготовлення перетворювачів, що працюють в режимі прийому і (або) випромінювання в умовах впливу сильних електричних полів і (або) механічної напруги. До них відносяться матеріали ЦТС-23, ЦТССт-3 (ЦТ) і ЦТБС -7. Матеріали ЦТС-23 і ЦТССт-3 (ЦТ) добре зарекомендували себе при використанні п'єзоелементів у системах запалювання і гідроакустики. ЦТССт-3 (ЦТ) і ЦТБС-7 можна рекомендувати для виготовлення п'єзотрансформаторів і ультразвукових випромінювачів підвищеної потужності.

					БР.171.061.003 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ локум.	Піппис	Лата		15

3. ПКМ для частотно-селективних пристроїв. Застосовуються для виготовлення п'єзоелементів (володіють підвищеною температурною і тимчасовою стабільністю частотних характеристик) частотно-селективних пристроїв на об'ємних і поверхневих акустичних хвилях (ПАХ) [1].

Матеріали для частотно-селективних пристроїв на об'ємних хвилях з плоскою вібрацією. В основному використовується при створенні фільтрів на дискретних п'єзоелектричних елементах. До них відносяться матеріали ЦТС-38, ЦТС-39 і ЦТС-40.

Матеріали для частотно-селективних пристроїв на об'ємних хвилях флуктуаційного режиму деформації стиску за товщиною. Представниками цієї підгрупи є матеріали ЦТС-35 та ЦТС-35У. ЦТС-35У випускається у вигляді гарячих пресованих блоків.

Матеріали для частотно-селективних пристроїв на об'ємних хвилях модуляції зсуву товщини. Представником цієї підгрупи є матеріал ЦТС-35. Матеріали в цих підгрупах виробляють монолітні фільтри для частотно-модульованих сигналів на частотах до 10 МГц.

Матеріали для частотно-селективних компонентів на поверхневих акустичних хвилях. Ця підгрупа відноситься до матеріалу ЦТС-33, який виготовляється у вигляді гарячого пресованих блоків. Він використовується при розробці фільтрів з частотами до 40 МГц.

4. Високотемпературні ПКМ. Високотемпературні ПКМ використовуються для виготовлення п'єзоелементів, що працюють при температурах не менше 250 ° С. У цю групу входять матеріали ЦТС-21, ЦТС-26, ТНАВ-1 і ТНВ-1, що забезпечують підвищені робочі температури п'єзоелементів (250-750 ° С). Для підвищення температурної стабільності п'єзомодуль ( $d_{33}$ ) розроблені модифікації матеріалів ЦТС-26 і Тнав-1, ЦТС-26М і ТНаВ-1М.

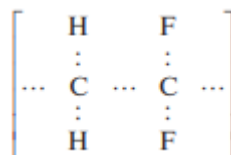
					БР.171.061.003 ПЗ	Арк
ЗМН	Арк	№ локум.	Пілпис	Дата		16



5. Електрооптичні матеріали. Електрооптичні матеріали використовуються для виготовлення активних елементів світломодулюючих, в тому числі захисних, пристроїв і цифрових індикаторів. У цю групу входять матеріали ЦТСЛ-А, ЦТСЛ-Б і ЦТСЛ-В. Елементи з матеріалу ЦТСЛ-А із залишковою поляризацією (заполяризовані) використовуються в режимі лінійного ЕО-ефекту (ефект Поккельса). Вони характеризуються також рекордно високими п'єзоелектричними та піроелектричними параметрами. Елементи з ЦТСЛ-Б і ЦТСЛ-В використовуються в світломодулюючих пристроях, що працюють в режимі квадратичного ЕО-ефекту (ефект Керра) в різних температурних інтервалах. Розроблені технології виготовлення електрооптичних п'єзо- і сегнетокераміки забезпечують отримання практично безпористої кераміки та ЕО-пластин з апертурою більше 3000 мм<sup>2</sup> і світлопропускання в діапазоні 0,5-8 мкм понад 98% від теоретичного [1].

## 1.2 П'єзоелектричні плівки

У 1969 році Каваї [2] виявив сильний п'єзоелектричний ефект в полівініленденфторидних (ПВДФ, PVDF) плівках, а в 1975 році компанія Pioneer Ltd випустила перші гучномовці і навушники, реалізовані на основі ПВДФ. ПВДФ - це напівкристалічний полімер, ступінь кристалізації якого становить 50%. Подібно до інших напівкристалічних полімерів ПВДФ є шарову структуру з аморфними зонами. Його хімічна формула складається з повторюваних ланок CF<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>:



Молекулярний вага ПВДФ дорівнює близько 105, що відповідає близько 2000 повторюваних ланок. Плівка є практично прозорою у видимому і ближньому ІЧ (інфрачервоному) діапазонах і поглинає випромінювання далекого ІК області електромагнітного спектра. Її щільність дорівнює близько 1780 кг / м<sup>3</sup>. ПВДФ є механічно міцним і гнучким матеріалом. Для

					БР.171.061.003 ПЗ	Анк
ЗМН	Анк	№ локум.	Пілпис	Дата		17

застосування в п'єзодатчиках цієї плівки зазвичай витягають в одному або відразу двох напрямках так, щоб її розміри збільшилися в кілька разів. Коефіцієнти пружності визначаються величиною розтягування. Наприклад, якщо плівка була розтягнута при температурі 140 ° С до співвідношення 4: 1, її модуль Юнга дорівнює 2,1 ГПа, а якщо до співвідношення 6,8: 1, модуль становить 4,1 ГПа. Питомий опір плівки залежить від величини її відносного подовження. Наприклад, при невеликому подовженні питомий опір дорівнює  $6,3 \cdot 10^{15}$  Ом · см, в той час як при ступені розтягування 7: 1 воно становить  $2 \cdot 10^{16}$  Ом · см. Хоча п'єзоелектричні константи плівки з ПВДФ не такі високі, як у деяких інших п'єзоматеріалів, вони мають унікальну властивість зберігати поляризацію навіть при впливі на них дуже сильних змінних електричних полів. Це означає, що, незважаючи на те, що значення  $d_{31}$  плівки з ПВДФ майже в 10 разів менше, ніж у ЦТС, її максимальна деформація може бути на порядок більше, ніж у того ж ЦТС, оскільки для ПВДФ гранично допустима величина електричного поля в 100 разів перевищує аналогічну характеристику для ЦТС.

До того ж плівки з ПВДФ володіють дуже хорошою часовою стабільністю: при зберіганні при температурі 60 ° С вони втрачають за шість місяців тільки близько 1-2% чутливості.

Іншою перевагою п'єзоплівки над п'єзокерамікою є їх низький акустичний імпеданс, який за значенням близький до води, людським тканинам та іншим органічним матеріалам [2].

Імпеданс п'єзоелектричної дифузії відрізняється від водневого імпедансу лише в 2,6 рази, а для п'єзокераміки - в 11 разів більше. Значення близького імпедансу дозволяють більш ефективно передавати акустичні сигнали у воді та тканині.

П'єзоелектричні плівки володіють наступними унікальними властивостями :

					БР.171.061.003 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		18

- широким частотним діапазоном:  $0.001 \dots 10^9$  Гц;
- великим динамічним діапазоном від мкТорр до Мбар;
- низьким акустичним імпедансом, близьким до води, людських тканин і клейових складів;
- високою пружною піддатливістю;
- високим вихідним напругою: в 10 разів вище, ніж у п'єзокераміки при однакових прикладених силах;
- високою електричною міцністю діелектрика: витримують поля до  $75 \text{ В/мкм}$ , при яких більшість п'єзокерамічних матеріалів втрачають поляризацію;
- високу механічну міцність і ударостійкість:  $10^9 \dots 10^{10}$  меж міцності;
- високою стабільністю: стійкістю до вологості (вологопоглинання менше  $0,02\%$ ), більшості хімічних реактивів, окисника, потужному ультрафіолетовому (УФ) і ядерного випромінювання;
- з них можна отримувати структури довільної форми;
- їх можна з'єднувати звичайними клеями.

Окремо можна виділити досліджувані плівки типу А2В6. Застосування напівпровідників А2В6: з усіх з'єднань типу А2В6 за масштабами застосування виділяються сульфід цинку ZnS і сульфід кадмію CdS. Перший є основою для багатьох промислових люмінофорів, а другий широко використовується для виготовлення фоторезисторів, що володіють високою чутливістю в видимій області спектра. Перевагу віддають люмінофорам із кубічною структурою зважаючи на підвищену яскравість світіння [3] .

П'єзоелектрикам властиві п'ять важливих характеристик: постійна деформації  $d$ , постійна п'єзоелектричної напруги  $g$ , коефіцієнт

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ локум.	Пілпис	Дата		19

електромеханічного зв'язку  $k$ , механічний коефіцієнт якості  $Q_M$  і акустичний імпеданс  $Z$  [4].

П'єзоелектрична постійна деформації  $d$ . Величина індукованої деформації залежить від електричного поля  $E$  і постійної деформації  $d$ :

$$x = d * E \quad (1).$$

П'єзоелектрична постійна напруга  $g$ . Напружене електричне поле  $E$  пов'язано із зовнішньою напругою  $X$  через постійну п'єзоелектричної напруги  $g$  (важлива цифра для застосування датчиків):

$$E = g * x \quad (2).$$

Беручи до уваги співвідношення  $P = d \cdot X$ , отримуємо важливе співвідношення між  $g$  і  $d$ :

$$g = \frac{d}{\epsilon \epsilon_0} \quad (3),$$

де  $\epsilon$  - діелектрична проникність.

У таблиці 2 наведені основні властивості п'єзоелектричних плівок.

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.ум.	Піппис	Дата		20

Таблиця 2. Основні властивості п'єзоелектричних плівок

Позначення	Параметр		ПВДФ	Сополімер	Одиниці вимірювання
$t$	Товщина		9,28,52,110	<1..1200	мкм
$d_{31}$	П'єзоелектричні модулі		23	11	$10^{-12} \frac{\text{м/м}}{\text{В/м}}$ або $\frac{\text{Кл/м}^2}{\text{Н/м}^2}$
$d_{33}$			-33	-38	
$g_{31}$	П'єзоелектричні коефіцієнти напруги		216	162	$10^{-3} \frac{\text{м/м}}{\text{В/м}}$ або $\frac{\text{Кл/м}^2}{\text{Н/м}^2}$
$g_{31}$			-330	-542	
$K_{31}$	Електромеханічні коефіцієнти зв'язку		12%	20%	
$K_1$			14%	25-29%	
$C$	Ємність		380 при 28 мкм	68 при 100 мкм	пФ/см <sup>2</sup> при 1кГц
$Y$	Модуль Юнга		2-4	3-5	$10^9 \text{ Н/м}^2$
$V_0$	Швидкість звуку	Відносне подовження	1,5	2,3	$10^3 \text{ м/с}$
		товщина	2,2	2,4	
$P$	Піроелектричний коефіцієнт		30	40	$10^{-6} \text{ Кл/}(\text{м}^2 \cdot \text{°K})$
$\varepsilon$	Діелектрична проникність		106-113	65-75	$10^{-12} \text{ Ф/м}$
$\varepsilon/\varepsilon_0$	Відносна діелектрична проникність		12-13	7-8	
$\rho_m$	Щільність маси		1,78	1,82	$10^3 \text{ кг/м}$
$\rho_0$	Об'ємний питомий опір		$>10^{13}$	$>10^{14}$	Ом*м
$R$	Питомий опір металізованої поверхні		< 3,0	< 3,0	Ом/площа для NiAl
$R$			0,1	0,1	Ом/площа для Ag барвників
$tg \delta_e$	Тангенс кута втрат		0,02	0,015	1 кГц
	Межа плинності		45—55	20—30	$10^6 \text{ Н/м}^2$ (осьове розтягнення)
	Температурний діапазон		-40...100(80)	-40...145 (115)	°C
	Вологопоглинання		<0,02	<0,02	%H <sub>2</sub> O
	Максимальна робоча напруга		750 (30)	750 (30)	В/мл (В/мкм), постійна напруга, 25 °C
	Напруга пробою		2000(80)	2000(80)	В/мл (В/мкм), постійна напруга, 25 °C

Як і інші фєроелектричні (п'єзоелектричні) матеріали, ПВДФ також володіє піроелектричними властивостями, тобто на його поверхні утворюється електричний сигнал при зміні температури. Плівки з ПВДФ сильно поглинають ІЧ промені в діапазоні довжин хвиль 7 ... 20 мкм. Цей діапазон відповідає спектру довжин хвиль, випромінюваних людським тілом. Однак, незважаючи на те, що самі плівки з ПВДФ можуть поглинати теплове випромінювання, в піроелектричних датчиках вони розташовуються між двома тонкими електродами, які іноді досить сильно відображають хвилі цікавить діапазону. У таких випадках електрод розташований ближче до джерела теплових випромінювань, або покривають теплопоглинальних шаром, або виготовляють з ніхрому (сплаву, що володіє високим поглинанням). На основі плівок з ПВДФ реалізують датчики переміщення людей, а також піроелектричні датчики для більш складних пристроїв, таких як відеокамери для нічного спостереження і лазерні копіювальні пристрої.

### 1.3 П'єзодатчики

На відміну від п'єзокерамічних перетворювачів, датчики на основі п'єзоелектричних плівок мають більш широкий динамічний діапазон і діапазон частот. Широкий діапазон частот (практично від 0 до 2 ГГц) і низький коефіцієнт якості можна пояснити м'якістю полімерів. Такі датчики широко використовуються в ультразвукових технологіях, що працюють на частотах до 50 кГц.

При використанні в ультразвукових передавачах (частота понад 500 кГц) частота п'єзодатчиків визначається коефіцієнтом  $d_{33}$ . Максимальний коефіцієнт передачі досягається на частоті резонансу по товщині. Основний напівхвильовий резонанс плівкового п'єзоелектричного сенсора товщиною 28 мкм настає на частоті близько 40 МГц. Частота резонансу завжди залежить від товщини плівки: вона змінюється від одиниць МГц для товстих плівок ( $\approx 1\ 000$  мкм) до  $> 100$  МГц для тонких плівок (близько мкм).

Датчики на п'єзоелектричних плівках мають і ряд недоліків. Вони мають досить слабкий електромеханічний коефіцієнт зв'язку з порівняно п'єзокерамічними сенсорами, особливо на частоті резонансу і на низьких частотах. Плівки з сополімерів можуть використовуватися і зберігатися при температурах, що не перевищують 135 ° С, а ПВДФ плівки рекомендується використовувати при температурах до 100 ° С .

Тонкі плівки з ЦТС володіють великим п'єзоелектричним модулем, ніж AlN і ZnO, що робить їх перспективними для використання в детекторах теплового випромінювання. Для формування шарів з ЦТС існує велика кількість методів, серед яких можна назвати електро-променеве розпилення, радіочастотне напилення, іонне осадження, епітаксіальне вирощування, магнетронного напилення, лазерне розпилення і золь-гелева технологія.

### 1.3.1 Класифікація п'єзодатчиків

П'єзоелектричні датчики можна розділити на два великих класи в залежності від фізичних ефектів, що лежать в їх основі [5].

До першого класу належать датчики, які використовують прямий п'єзоелектричний ефект. Вони використовуються для вимірювання лінійних і коливальних прискорень, динамічних і квазістатичних тисків і сил, параметрів звукових і ультразвукових полів та інших.

До другого, не менш великому класу, відносяться так звані резонансні п'єзодатчики [5]. В їх основі може лежати зворотний п'єзоефект (резонансні п'єзоперетворювачі на основі п'єзоелектричних резонаторів), а також зворотний і прямий п'єзоефекти (резонансні п'єзодатчики на основі п'єзоелектричних трансформаторів). Крім того, в їх основі лежать інші фізичні ефекти (тензочутливість, акусточутливість, термочутливість і ін.), що дозволяє використовувати їх для вимірювання статичних та динамічних тисків і зусиль, лінійних і вібраційних прискорень, концентрацій речовин в газах, в'язкості, кутів нахилу і ін.

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.ум.	Піппис	Дата		23

### 1.3.2 Підвищення чутливості п'єзоелектричних датчиків

Підвищення чутливості п'єзоелектричних датчиків, зокрема, біоморфних, в ряді випадків є актуальним, так як дозволяє збільшити дальність виявлення підводних і надводних об'єктів, збільшити діапазон вимірювання п'єзоелектричних далекомірів і т.д.

Зазвичай для підвищення чутливості датчиків застосовується п'єзокераміка з великим п'єзомодулем. Крім того, підвищення чутливості біморфних п'єзодатчиків можна домогтися оптимізацією розмірів (товщини, діаметрів) п'єзоелементів і металевих пластин, однак це, по суті, пов'язано з заміною одного п'єзоелемента на інший - з іншими розмірами, з іншого п'єзокераміки, а також з заміною однієї металевої пластини на іншу - з іншого матеріалу з іншими фізико-механічними характеристиками і т. Д. В даному розділі розглянемо можливість підвищення чутливості датчика шляхом зміни схеми підключення датчика. Для реалізації цієї мети використовуємо прості і цілком очевидні закономірності.

Як відомо, чутливість будь-якого датчика може бути визначена по формулі:

$$S = \frac{dy}{dx} \quad (4),$$

де  $x$  – вхідна величина,  $y$  – вихідна величина.

Для п'єзоелектричних датчиків чутливість по заряду можна визначити за формулою:

$$S_q = \frac{dq}{dP_{зв}} \quad (5),$$

де  $q$  – заряд, який створюється на електродах п'єзоелемента,  $P_{зв}$  – звуковий тиск.



Чутливість по напрузі:

$$S_u = \frac{dU}{dP_{зв}} \quad (6),$$

де  $U$  – напруга на п'єзоелементі.

Заряд на п'єзоелементі можна визначити за формулою:

$$q = d_{ij}F = d_{ij}P_{зв}S \quad (7),$$

де  $d_{ij}$  – п'єзомодуль,  $F$  – сила, діюча на п'єзоелемент,  $S$  – площа п'єзоелементу, на яку діє тиск  $P_{зв}$ .

Слід зазначити, що величина заряду на електродах при інших рівних умовах пропорційна площі цих електродів. При нерівності площ електродів на поверхні п'єзоелемента в розрахунок береться менша площа.

Ємність п'єзоелемента пропорційна площі  $S_{ел}$  електродів і визначається за відомою формулою:

$$C_{ne} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S_{ел}}{\delta} \quad (8),$$

де  $\varepsilon_0$  – діелектрична проникність вакууму,  $\varepsilon_0 = 8,85 * 10^{-12}$ , Ф/м;  $\varepsilon_r$  – відносна діелектрична проникність;  $\delta$  – відстань між двома електродами.

Напруга на п'єзоелементі:

$$U_{ne} = \frac{q}{C_{ne}} \quad (9).$$

Звідси слідує, що, так як і заряд, і ємність п'єзоелементу пропорційна площі електродів, то напруга на п'єзоелементі від площі електродів не залежить.

Розглянемо зараз конструкцію дискового п'єзоелементу, у якого електроди розділені на дві частини:

					БР.171.061.003 ПЗ	Арк
Змн	Арк	№ док.ум.	Підпис	Дата		25



Рис 2. П'єзоелемент з розділеними електродами

На рисунку 2 : 1-4 – електроди, 5- п'єзоелемент.

В цьому випадку електрод на кожній торцевій поверхні п'єзоелементу розподілений на дві рівні частини(1-3 і 2-4). Ємність між частинами електродів 1-2 і 3-4 однакові, тобто  $C_{1-2} = C_{3-4}$ .

Збільшити напругу на п'єзоелементі можна, якщо зменшити ємність між електродами п'єзоелементу.

Цю вимогу для конструкції датчика, зображеного на рис.2, можна реалізувати, якщо в якості сигнальних(вихідних) електродів використовувати електроди 1-2 або 2-3.

Результати вимірів ємності і вихідної напруги на частоті 200 Гц і звуковому тиску 114дБ (10 Па) для біморфного п'єзоелементу, виготовленого з п'єзоелементу із п'єзокераміки ЦТС-19 діаметром 30 мм і товщиною 0,8 мм, і металічною пластиною діаметром 36 мм з напівтвердої латуні Л63, показані у табл.3

Як слідує з таблиці 4, чутливість (по напрузі) у даному випадку підвищена більше ніж у 10 разів.

Таблиця 4. Результати виміру ємності між електродами

П'єзоелемент	Ємність між двома електродами, нФ			
	1-2	3-4	1-4	2-3
Ø 30 * 0,8 мм	4, 2	4, 2	0,392	0,393

Таблиця 5. Результати виміру напруги на електродах

П'єзоелемент	Напруга на електродах, мВ			
	1-2	3-4	1-4	2-3
Ø 30 * 0,8 мм	22	22	235	233

Відмічу, що, простіша заміна схеми підключення електродів п'єзоелементу призводить до істотної зміни динамічних характеристик датчику. Так, на рис.3 показано перехідну характеристику датчиків при дії на них електричної напруги у формі меандру (рис.3, а). Для традиційного датчику перехідний процес відповідає коливальній ланці (рис.3, б), а для пропонованої схеми датчик володіє властивостями диференційованої ланки.

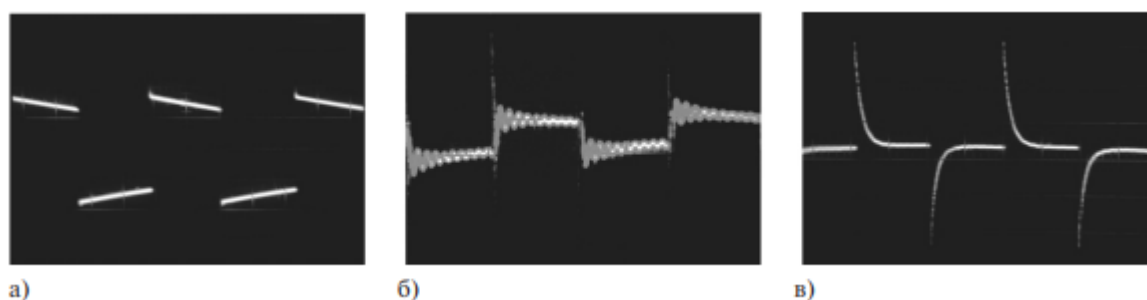


Рис.3 Перехідні характеристики п'єзодатчиків при дії на них електричної напруги у формі меандра (а); традиційна схема (б) і схема доменно – дисипативного датчику(в).

## Висновки:

Розглянуто принцип п'єзоелектричного ефекту (прямого та зворотнього), матеріали, на яких проявляється п'єзоелектричний ефект. Описані п'єзодатчики та їх класифікація. Приведена класифікація ПКМ та їх сфери застосування. Описані унікальні властивості п'єзоплівки і переваги їх використання перед п'єзокерамікою. Також, приведені основні співвідношення для розрахунку чутливості п'єзоелектричних датчиків та варіанти підсилення цієї характеристики. Приведений розрахунок та таблиця з розрахунковими даними.

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ докум.	Підпис	Дата		28

## 2. Методи дослідження п'єзоелектричних датчиків

Анізотропія фізико-математичних властивостей п'єзоелектриків і взаємозв'язок електромагнітного поля з механічними рухами істотно ускладнюють опис процесів деформування і міцності. У зв'язку з цим значна увага приділяється розвитку і створенню математичних методів кількісного аналізу.

Основні співвідношення лінійної теорії електропружності [6] складаються з рівнянь, що описують механічну сторону п'єзоефекту (ці рівняння випливають з законів збереження, необхідних геометричних зв'язків і справедливі для будь-якої лінійної середовища), і рівнянь Максвелла, що описують електричні явища в середовищі. Зв'язок між змінними двох типів рівнянь визначається фізичними співвідношеннями - рівняннями п'єзоефекту.

З механічної боку в них входять симетричні тензори напружень і деформацій, з електричною - вектори електричної індукції і напруженості електричного поля. Коефіцієнти лінійного зв'язку є комплексними. Введення комплексних коефіцієнтів дає можливість врахувати дисипації в умовах циклічного деформування п'єзоелектрика.

Визначальна система рівнянь для п'єзоелектричного тіла складається з двадцяти двох диференціальних рівнянь. Точне вирішення задачі граничної величини електропружності можливе лише в рідкісних випадках для найпростіших областей. Для практично важливих завдань необхідно задовольнятися наближеним рішенням.

Ефективним засобом створення наближених рішень є варіаційні методи. Вирішення проблеми при формулюванні варіацій полягає в пошуку функцій, в яких функція відповідного варіаційного принципу має стійке значення.

Суттєве значення для розуміння процесів, що протікають в п'єзоелектричних тілах, мають рішення одновимірних задач для тіл з

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док-м.	Піппис	Дата		29

вироджених геометрією - стрижнів, тонких дисків і пластин, кілець, нескінченних циліндрів. Коливання таких тіл описуються скалярними рівняннями, точні вирішення яких будуються досить просто.

Альтернативний підхід полягає в заміщенні п'єзоелектрика еквівалентною електричною схемою [6] з подальшим розрахунком по теорії електричних ланцюгів. Такий підхід природний при вирішенні питання про погодження і загальному аналізі електричного кола, частиною якої є схема заміщення п'єзоелектрика. Але питання механічної та електричної міцності, оптимального конструювання (особливо для об'єктів, описуються не скалярними моделями) залишаються за рамками теорії електричних ланцюгів.

Одномірні завдання є особливо практичними. По-перше, в багатьох специфічних пристроях реалізуються одновимірні коливальні режими, а по-друге, комплексні коефіцієнти фізичних співвідношень визначаються експериментально шляхом вимірювання в одновимірних режимах.

Великий клас завдань складають завдання про вісесиметричних коливаннях п'єзоелектричних тіл. Вісесиметричні коливання, будучи просторовими з фізичної точки зору, математично описуються двовимірними рівняннями [7]. Для аналізу перетворювачів широко застосовуються також методи теорії автоматичного управління. Нарешті, найбільш точні результати можуть бути отримані експериментальним шляхом.

## 2.1 Рівняння стану п'єзоелектрика.

Є два феноменологічних рівняння, що описують в лінійному наближенні електромеханічне стан п'єзоелектричній середовища. Перше рівняння пов'язує компоненти тензора пружного напруження  $T_{ij}$  з компонентами тензора деформації  $S_{kl}$  і компонентами вектору напруженості електричного поля  $E_m$ .

$$T_{ij} = C_{ijkl}^2 S_{kl} - e_{mij} E_m \quad (10).$$

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.	Піппис	Дата		30

Перший доданок в правій частині рівняння висловлює відомий закон Гука для пружного середовища. Другий доданок описує п'єзоефект, що полягає в тому, що електричне поле породжує пружну напругу. Для кристала і перший, і другий доданок у формулі представляє собою суму по повторюваним індексам  $k, l$  і  $m$ , кожен з яких може приймати значення 1, 2, 3 [8].

В ньому  $C_{ijkl}^E$  і  $e_{mij}$  - коефіцієнти пропорційності, є матеріальними константами.  $C_{ijkl}^E$  - компонента тензора четвертого рангу, званого тензором модулів пружності (жорсткості); верхній індекс  $E$  означає, що ця величина отримана при  $E = \text{const}$ ;  $e_{mij}$  - компонента тензора третього рангу, званого тензором п'єзомодуля;  $S_{kl}$  - безрозмірна деформація, пов'язана з компонентами вектора зміщення  $u$ , формулою:

$$S_{kl} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right] \quad (11).$$

Друге рівняння стану п'єзоелектрика пов'язує компоненти вектора електричного зміщення (індукції)  $D$  з компонентами тензора деформації  $S$  і вектора напруженості електричного поля  $E$ :

$$D_m = e_{nkl} S_{kl} + e_{nm}^s E_m \quad (12).$$

Коефіцієнтами пропорційності тут служать компоненти п'єзоелектричного тензора  $e_{nkl}$  і компоненти тензора діелектричної проникності  $e_{nm}^s$ , знайдені при  $S = \text{const}$ . У правій частині рівняння другий доданок пов'язує електричну індукцію з напруженістю електричного поля як в діелектрику. Перший доданок відображає досвідчений факт поляризації п'єзоелектрика під дією деформації навіть за відсутності зовнішнього електричного поля [9].

## 2.2 Коефіцієнт електромеханічного зв'язку.

На поширення плоских пружних хвиль в п'єзоелектричній середовищі впливають лише поздовжні компоненти електростатичних полів, викликаних поляризацією п'єзоелектрику. Пружні хвилі, супроводжувані поздовжніми п'єзополлями, називаються п'єзоактивними. Для них ефективний модуль пружності посилюється. Величина цього посилення і визначає коефіцієнт електромеханічного зв'язку, який визначається формулою [9] :

$$k = \sqrt{1 - C/C^x} \quad (13),$$

де  $C$  –модуль пружності п'єзоелектрику до його збільшення,  $C^x$  – збільшений за рахунок п'єзоефекту модуль пружності.

Щільність внутрішньої енергії кристала (в нехтуванні тепловими і магнітними членами) можна записати як суму механічної та електричної енергій:

$$W = \frac{1}{2} S_{ij} T_{ij} + \frac{1}{2} D_m E_m \quad (14).$$

Якщо підставити вирази  $T_{ij}$  і  $D_m$  з минулого пункту, то отримаємо:

$$W = \frac{1}{2} S_{ij} (C_{ijkl} S_{kl} - e_{mij} E_m) + \frac{1}{2} (e_{mij} S_{kl} + \varepsilon_{mk} E_k) \quad (15).$$

Перший доданок в цьому виразі є щільність пружної енергії, друге - щільність електричної енергії і третє - щільність так званої взаємної енергії або енергії електромеханічної взаємодії. Відповідно до висловлених визначення можна отримати [9]:

$$k_{ikl} = \frac{e_{ikl}}{\sqrt{C_{k\ kil} \varepsilon_{ik}}} \quad (16).$$



## 2.3 Рівняння Максвелла.

При побудові теорії п'єзоелектричного перетворювача рівняння Максвелла використовуються в наступному вигляді:

$$\operatorname{rot} E = \frac{\partial B}{\partial t} \approx 0 \quad (17),$$

$$\operatorname{rot} H = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (18),$$

$$\operatorname{div} D = 0 \quad (19).$$

Перше з цих рівнянь означає, що теорія будується в квазістатичному наближенні. Для обґрунтування цього можна навести такі міркування. Електричні поля, що породжуються в п'єзоелектрику пружною хвилею виникають завдяки перерозподілу цієї хвилею позитивних і негативних зарядів в обсязі середовища. Створений при цьому зарядовий "рельєф" переноситься пружною хвилею зі швидкістю звуку. Остання в приблизно 10<sup>5</sup> разів менше швидкості поширення електромагнітних хвиль. Тому зазначені заряди можна вважати нерухомими, а електричні поля, створювані ними - потенційними, котрі підпорядковуються законам електростатики [10].

У другому рівнянні відсутня щільність струму провідності і залишена тільки щільність струму зміщення  $\partial D / \partial t$ . Це пов'язано з тим, що п'єзоелектрик, який використовується в електроакустичних перетворювачах, повинен бути непровідним. В іншому випадку він буде шунтуватися власною провідністю, яка знизить в ньому амплітуду змінної поля. Рівність нулю дивергенції в третьому рівнянні впливає з того, що п'єзоелектрик вважається непровідним і щільність об'ємного заряду в ньому дорівнює нулю.

## Висновки:

В даній главі розглянуто методи вимірювання п'єзоелектричних приладів та пристроїв, їх характеристики. Детально описано розрахунок стану п'єзоелектрика та коефіцієнт електромеханічного зв'язку. Встановлено зв'язок між ними.

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.ум.	Підпис	Дата		34

### 3. Експериментальна частина

#### 3.1 Технологія отримання плівок А2В6

Полікристалічні шари CdS товщиною 4–5 мкм вирощувались методом квазізамкненого об'єму на металізованих діелектричних пластинах.

Далі представлено поетапну технологію виготовлення плівки.

Кварцевий стакан з двома відростками, які потрібні для двох порошоків і у нашому випадку CdS та ZnS (рис.4).



Рис.4. Кварцевий стакан з двома відростками

До стакану насипаємо CdS (1 гр.) та ZnS (0,5 гр.). Нагрівач, на який намотаний молібденовий дріт, називають нагрівачем відростка. Ставимо екран (рис. 5). Є два екрани: маленький – для того, щоб порошок не вискакував із стакану, оскільки нагрів не однорідний, концентрація по об'єму різна – тому вміст здатний трохи «вибухати», і для захисту підкладки ставиться цей екран, та основний екран – слугує для того, щоб підігрівати пари, яка утворилися в результаті сублімації порошоків. Екрани виготовляються з молібдену.



Рис.5. Вакуумне обладнання, екрани.



Рис. 6. Термопары.



Ставимо 4 термопари (рис. 6) для реєстрації (2 знизу на відростках, термопара камери та термопара ситалової пластини). В якості підкладинки ми використовуємо ситал (діелектрик), на який попередньо був нанесений прошарок молібдену, який виконує функцію струмоз'єдного контакту. Для створення певної геометрії плівки, що напильється, ми використовуємо металеву маску (рис. 7) в якій зроблено певний отвір, що відповідає потрібній геометрії.

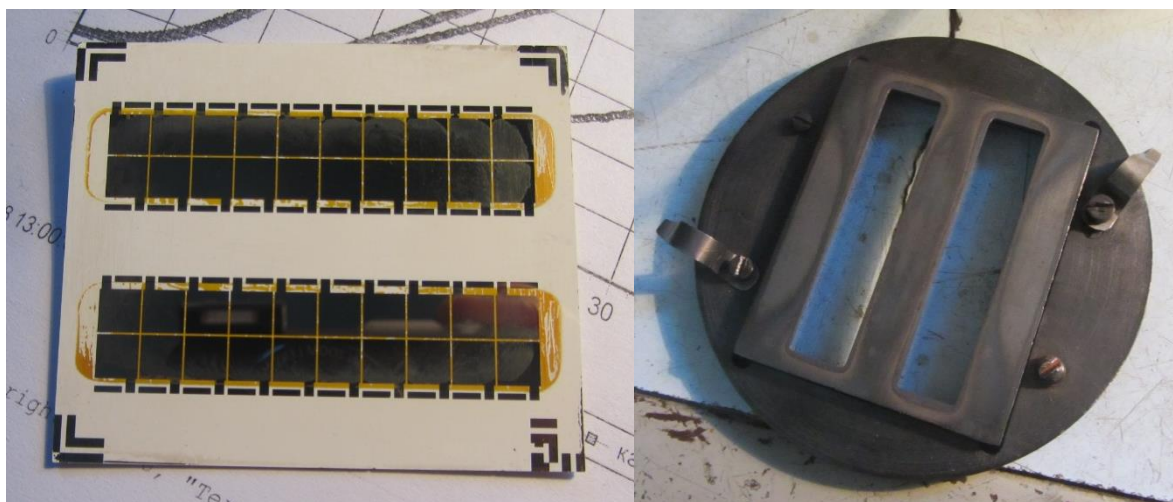


Рис.7. Металева маска та її тримач.

Після встановлення усіх елементів до камери, опускаємо вакуумний ковпак. Температура на CdS  $-780^{\circ}\text{C}$ , а на ZnS  $-900^{\circ}\text{C}$ . Вмикаємо форвакуумний насос. Після 15-20 хвилин роботи форвакуумного насосу вмикаємо дифузійний насос для отримання відповідного рівня вакууму ( $10^{-4}$  мм.рт.ст). Після отримання відповідного рівня вакууму вмикаємо нагрівачі. Спочатку випаровується порошок CdS, через 25 хвилин, вмикаємо нагрівач для ZnS і при досягненні температури  $900^{\circ}\text{C}$ , тримаємо цю температуру впродовж 10 хвилин, коли йде випаровування порошку ZnS. Графіки на яких зображено температури випаровування та час представлені на рисунку 8. Після напильня готовий екземпляр віддається на корпусування.

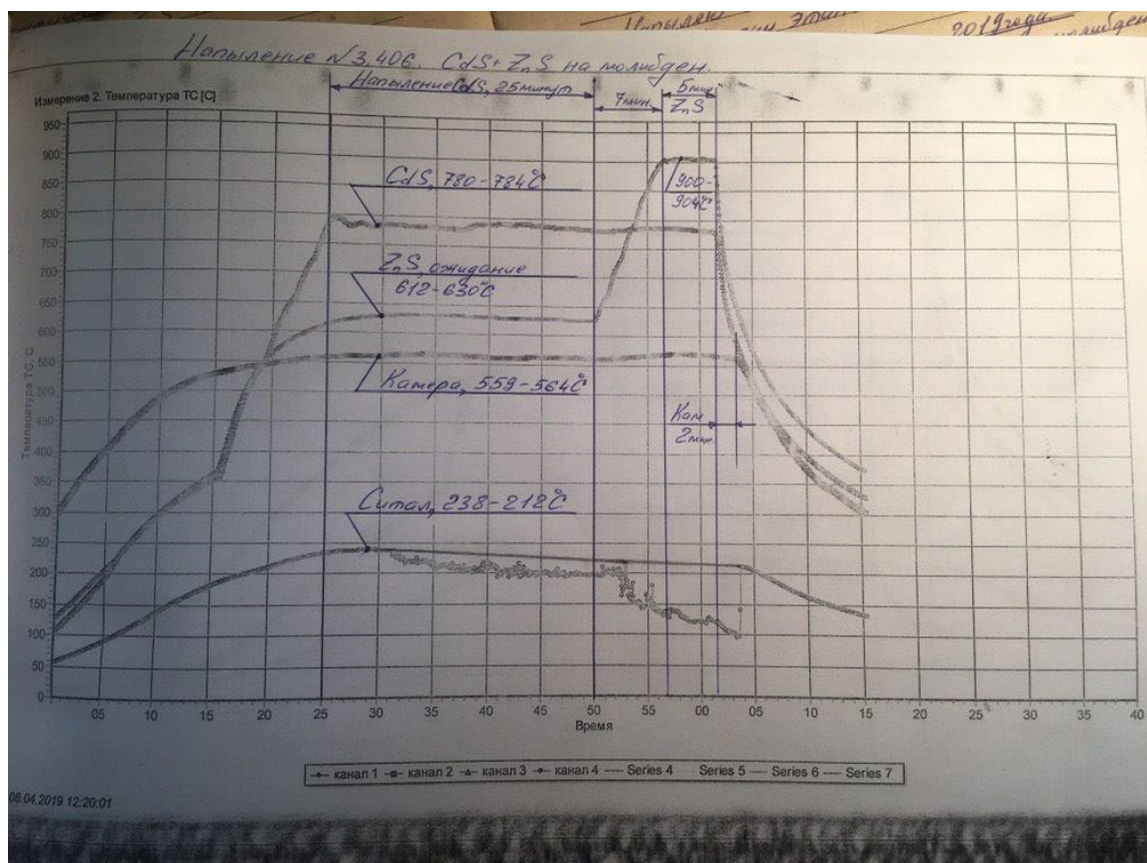


Рис. 8. Температурний графік виготовлення плівки.

### 3.2 Дослідження властивостей п'єзоплівок методом амплітудно-частотних характеристик за допомогою приладу «ОБЗОР-103»

Найбільш точні результати можуть бути отримані експериментальним шляхом. П'єзохарактеристики були виміряні за допомогою векторного аналізатору «ОБЗОР-103» (рис.9).

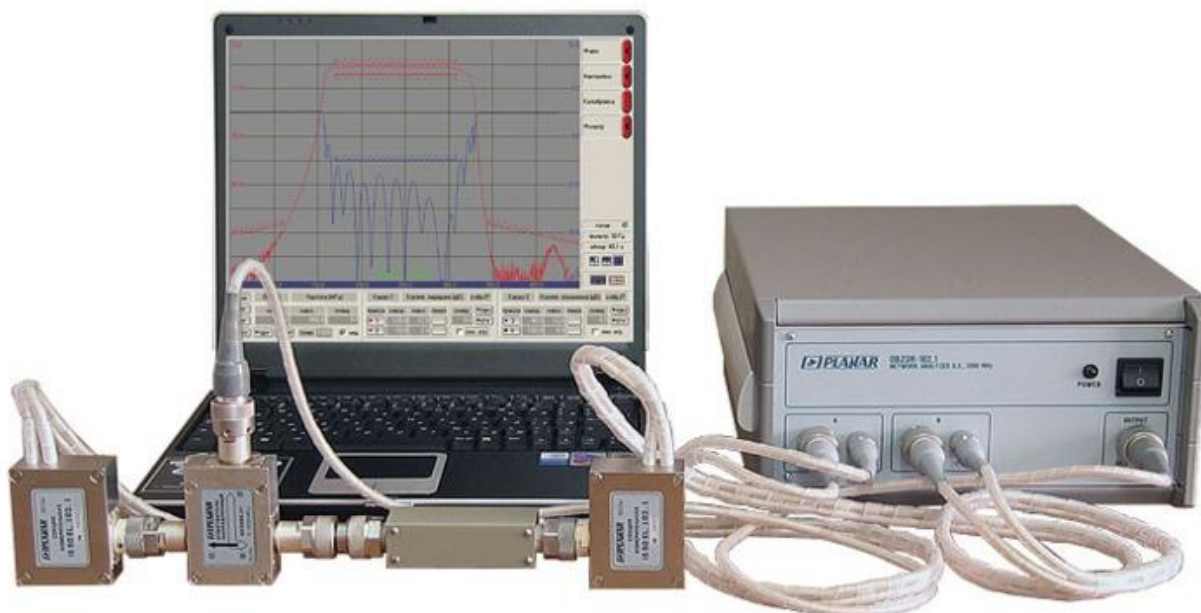


Рис. 9. Векторний аналізатор ланцюгів «ОБЗОР - 103».

Векторний аналізатор ланцюгів - це прилад, який вимірює характеристики проходження сигналу через тестовий пристрій і характеристики відображення сигналу від його портів [12].

Область застосування вимірювача - розробка, налаштування, перевірка різних радіотехнічних пристроїв і компонентів в лабораторних умовах і в умовах промислового виробництва, в тому числі в складі автоматизованих вимірювальних стендів [12].

Вимірювач комплексних коефіцієнтів передачі складається з вимірювального блоку, двох вимірювальних секцій, спрямованого відгалужувача.

Наші виміри були зроблені за допомогою приладу ОБЗОР-103 (рис 10).

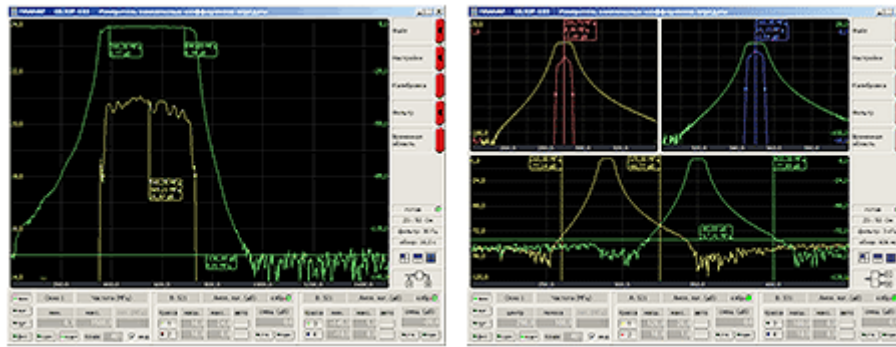


Рис. 10. Вимірювач комплексних коефіцієнтів передачі та відображення (векторний аналізатор ланцюгів) ОБЗОР-103.

Вимірювач комплексних коефіцієнтів передачі або векторний аналізатор ланцюгів призначений для вимірювання  $S$  - параметрів радіотехнічних пристроїв. Вимірювані параметри включають комплексний коефіцієнт відбиття  $S_{11}$  і комплексний коефіцієнт передачі  $S_{21}$ . Для індикації вимірюваних  $S$  - параметрів використовуються наступні формати: логарифм амплітуди, фаза, ГВЗ, КСВ, реальна і уявна частини, розширена фаза, лінійна амплітуда, потужність, полярна діаграма і діаграма Вольперт – Сміта [12].

Кожен  $S$ -параметр містить амплітудно-частотну (АЧХ) і фазо-частотну (ФЧХ) характеристики тестового пристрою у відповідному напрямку [12].

Щоб отримати інформацію про  $S$ -параметри, досліджуваний пристрій необхідно ввімкнути в вимірювальний тракт приладу і подати на нього сигнал, промодульований по одному з параметрів (амплітуді, частоті або фазі). Сигнал, що пройшов через досліджуваний пристрій або відбитий від нього, несе корисну інформацію про його властивості, для вилучення якої необхідно цей вимірювальний сигнал порівняти з деяким вихідним (опорним) сигналом. Отже, схема аналізатора ланцюгів повинна містити вимірювальний і опорний канали та перетворювач інформаційних сигналів. При цьому реалізація будь-якого методу вимірювання фази  $S$ -параметрів вимагає порівняння невідомої фази вимірювального сигналу (відбитого від



випробуваного пристрою або що пройшов через нього) з фазою якогось когерентного опорного сигналу.

Для визначення характеристик різноманітних досліджуваних пристроїв в їх повних робочих діапазонах частот необхідно, щоб векторний аналізатор ланцюгів дозволяв проводити вимірювання в досить широких і регульованих смугах частот з відображенням інформації на екрані монітора, тобто проводити панорамні вимірювання з можливістю регулювання ширини частотної смуги перегляду і вимірювання потрібних характеристик [12].

Коефіцієнт відображення і коефіцієнт стоячої хвилі служать для оцінки узгодженості або збігу комплексних опорів джерела, навантаження і лінії передачі.

Характеристики приладу:

- Вимірювані параметри: комплексний коефіцієнт відбиття  $S_{11}$ , комплексний коефіцієнт передачі  $S_{21}$ ;
- Діапазон частот від 0,3 до 1500 МГц;
- Динамічний діапазон більше 130 Дб;
- Мінімальний час виміру однієї частотної точки 200 мкс;
- Вимірювальні тракти: 50 Ом, 75 Ом.

При вимірюванні ми використовували вище згаданий аналізатор «ОБЗОР-103» (рис. 11).

За допомогою цього приладу ми змогли виміряти амплітудно-частотну характеристику нашої плівки.

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ локум.	Піппис	Дата		40



Рис 11. Вимірювання за допомогою приладу «ОБЗОР-103».

Отримані характеристики, представлені на рис.12, рис.13 та рис.14. За результатами вимірів ми зафіксували резонансні смуги. Також, можемо побачити наступне: на рисунках гострий пік вниз означає, що ми спостерігаємо за резонансом, і в той же час, наступний пік догори – це антирезонансом.

Далі по резонансним та антирезонансним пікам ми можемо зробити робити майбутні розрахунки наших п'єзохарактеристик.

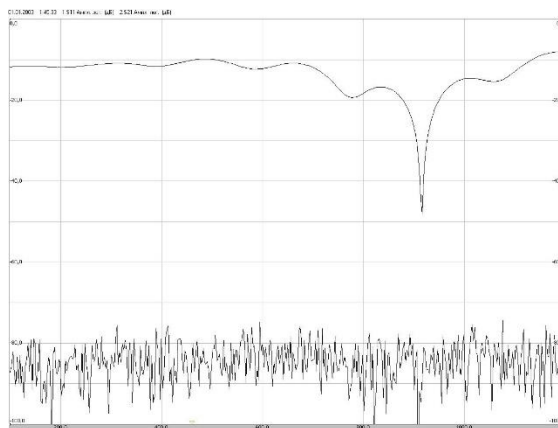


Рис.12. Результат вимірювання першого зразку п'єзоплівки за допомогою приладу «ОБЗОР-103».

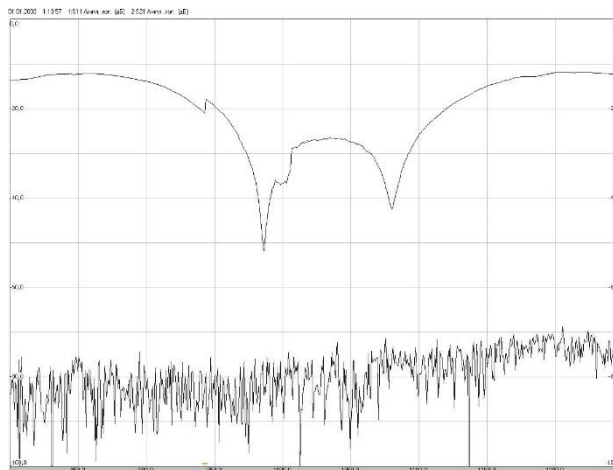


Рис.13. Результат вимірювання другого зразку п'єзоплівки за допомогою приладу «ОБЗОР-103».

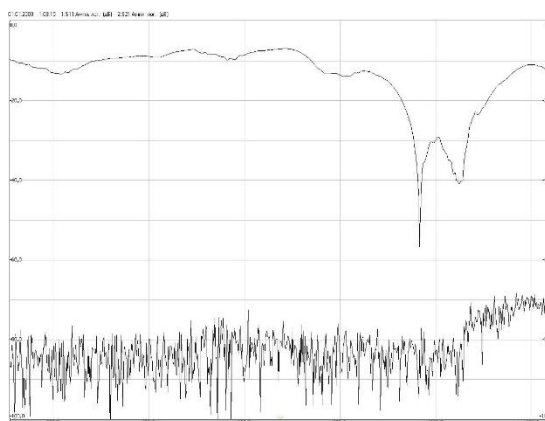


Рис 14. Результат вимірювання третього зразку п'єзоплівки за допомогою приладу «ОБЗОР-103».

### 3.3. Моделювання п'єзоелементу за допомогою коливального контуру

Наш п'єзоелектрик можна представити у вигляді коливального контуру(рис 12). Для п'єзоелектриків частіше всього використовують паралельний коливальний контур [13] .

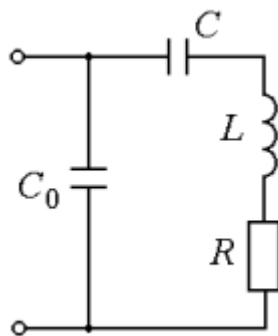


Рис. 12. Еквівалентна схема вимірювання характеристик п'єзоелектрика.

П'єзорезонатори є елементної базою великої кількості приладів і систем в гідроакустиці, віброметрії, радіоелектроніці і т.д. Основним параметром, що зв'язує електричний і механічний бік, і характеризує якість ПКЕ, може виступати п'єзомодуль п'єзоелектричного матеріалу, з якого він виготовлений. Найбільш поширеними методами визначення п'єзомодулю в динамічному режимі є метод «резонансу-антирезонансу» і GBW-метод, описані, наприклад, в роботі [14]. Ці методи використовують як для дослідних цілей, так і для вирішення завдань пов'язаних з діагностикою ПКЕ.

Використання електромеханічних аналогій і поняття електромеханічного трансформатора [14], дозволяє замінити розгляд реального ПКЕ з електричної боку розглядом його еквівалентної електромеханічної схеми з зосередженими параметрами, яка в області частот відокремленого резонансу без урахування діелектричних втрат має вид, показаний на рис.12.

Дотримуючись рис. 12, можна говорити, що коливання в механічній системі ПКЕ виникають за рахунок електричної енергії, отриманої коливальною системою внаслідок п'єзоефекту від електричного генератора через електромеханічний трансформатор з певним коефіцієнтом трансформації.

Основна особливість еквівалентної електричної схеми ПКЕ, показаної на рис. 12, - наявність двох коливальних контурів: послідовного RLC контуру

і паралельного  $RLCC_0$  контуру. Це призводить до того, що ця схема має два резонанси: механічний резонанс (послідовний коливальний контур) і електромеханічний (паралельний коливальний контур). Оскільки провідність послідовного коливального контуру на частоті механічного резонансу максимальна, а провідність паралельного коливального контуру на частоті його резонансу, навпаки, мінімальна, то електромеханічний резонанс називають антирезонансом і відповідну резонансну частоту – частотою антирезонансу.

Метод можна сформулювати, спираючись на зв'язок п'єзомодулю з параметрами елементів еквівалентної електричної схеми ПКЕ, представляє собою електричну ємність  $C_0$ , паралельно якій підключена ланка з послідовно включеною динамічною ємністю  $C$ , індуктивністю  $L$  і опором  $R$ , що характеризують динамічні властивості ПКЕ [15].

Справедливе відношення:

$$d_{ij}^2 = \beta_{ij} \frac{1}{\omega_p^2 L} = \beta_{ij} C \quad (20),$$

де  $\beta_{ij}$  – константа, яка залежить від геометрії, розмірів ПКЕ і компоненту пружної піддатливості п'єзоматеріалу.

З цієї формули слідує те, що будь-який з методів визначення параметрів еквівалентної електричної схеми, наприклад, ємності або індуктивності динамічної ланки, автоматично являється визначенням п'єзомодулю.

Механічна добротність  $Q_m$  визначається формулою:

$$Q_m = \frac{1}{\omega_p RC} \quad (21).$$

Динамічну ємність можна визначити, знаючи максимальне значення активної складової провідності і механічної добротності ПКЕ.

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.ум.	Піппис	Дата		45

Аналіз існуючих методів визначення добротності показує, що з точки зору розв'язуваної задачі становить інтерес метод, описаний в [15]. Відповідно до цього методу збуджують коливання п'єзореzonатора в області резонансу шляхом впливу на нього електричним синусоїдальним напругою зі змінною частотою з одночасним виділенням активної складової провідності і її диференціюванням, вимірюють частоту резонансу і частоту, відповідну максимальному значенню похідної від активної складової провідності  $\omega_{\max}$  [15]. Для виміру ми взяли структури плівки CdS. Молибденова фольга слугує нижнім струмознімальним контактом. У ролі верхнього струмознімального контакту ми використовуємо вироджений напівпровідник р-типу  $\text{Cu}_2\text{S}$ .

Очевидно, що при відомих параметрах ПКМ - ємності на низькій частоті, частоті механічного резонансу, ефективному коефіцієнті електромеханічного зв'язку та механічній добротності параметри елементів його еквівалентної електричної схеми можуть бути визначені, наприклад, за формулами:

$$C = k_e^2 C^T, L = \frac{1}{\omega_p^2 C^T k_e^2},$$

$$R = \frac{1}{\omega_p C^T k_e^2 Q_m}, C_0 = C^T (1 - k_e^2) \quad (22).$$

Однак для визначення  $C_0$ ,  $C$ ,  $L$ ,  $R$  необов'язково спочатку вимірювати спочатку параметри ПКМ. Необхідні відомості можна отримати і безпосередньо за результатами вимірювання частотних характеристик провідності або вимірювання перехідного процесу при імпульсному збудженні ПКМ [17].

Якщо значення модуля провідності вимірювалися тільки в області частот механічного резонансу, то:

$$Q_m = \frac{\omega_p}{\Delta\omega_Y}, R = \frac{1}{|Y_m|},$$

$$L = \frac{R}{\Delta\omega_Y}, C = \frac{\Delta\omega_Y}{\omega_p^2 R}, C_0 = C^T - C \quad (23).$$

При вимірюванні частотної характеристики активної складової провідності для розрахунку параметрів еквівалентної електричної схеми ПКМ можна використовувати формули області частот механічного резонансу, замінивши в них ширину резонансної кривої  $\Delta\omega_Y$  на ширину резонансної кривої активної складової провідності  $\Delta\omega$ :

$$L = \frac{R}{\Delta\omega}, C = \frac{\Delta\omega}{\omega_p^2 R} \quad (24).$$

Інший можливий метод визначення параметрів елементів еквівалентної схеми ПКМ заснований на інтегруванні частотної залежності активної складової провідності в області частот механічного резонансу. Цей метод зручний для реалізації в інформаційно-вимірювальних системах [17].

У тих випадках, коли для ПКЕ з високою добротністю і великим значенням фактора якості виникають труднощі при точній реєстрації максимуму і мінімуму модуля провідності, можна використовувати інший метод визначення параметрів еквівалентної електричної схеми, що полягає в наступному. Знаходимо частоти  $\omega_1$  і  $\omega_2$ , на яких вхідний опір ПКЕ чисто активний і так само  $Z_1$  і  $Z_2$ . Ці частоти відповідають точкам переходу фази провідності через нуль.

Таким чином ми можемо виміряти параметри схеми для еквівалентної схема вимірювання характеристик п'єзоелектрика.

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док-м.	Піппис	Дата		47

## Висновки:

У даній главі було продемонстрована технологія отримання п'єзоплівок та прилади, які були використанні під час вирощення плівки. Показано температурний графік всього процесу виготовлення плівки. Проведений опис векторного аналізатору ланцюгів «ОБЗОР -103», його характеристики, область використання та вимірюванні характеристики. Продемонстровано його роботу і показано результати вимірів на сам прилад.

					БР.171.061.003 ПЗ	Анк
Змн	Анк	№ докум.	Підпис	Дата		48



#### 4.Розрахункова часина

За результатами вимірів ми зафіксували резонансні смуги. Також, можемо побачити наступне: на рис.9 та рис. 10 гострий пік вниз означає, що ми спостерігаємо за резонансом, і в той же час, наступний пік догори – це антирезонанс.

Виходячи з вимірної амплітудно-частотної характеристики ми можемо визначити добротність наших зразків. Як відомо, добротність визначається за формулою :

$$Q = \frac{\omega_p}{\Delta\omega} \quad (25),$$

де  $\omega_p$  – частота резонансу, а  $\Delta\omega$  – діапазон по рівню 0,7. Отримані дані було занесено до таблиці 6.

Таблиця 6. Розрахункові значення амплітудно-частотної характеристики п'єзоплівки.

Зразок	$\omega_p$	$\Delta\omega$	$Q$
1	914	12	76,16
2	969	13	74,5
3	1008	74	13,62
4	987	13	76
5	950	56	17

З отриманих даних, можемо далі розрахувати усі необхідні параметри п'єзоплівки за формулами [19], далі отримуємо дані ємностей та індуктивності, які стоять у коливальному контурі і оцінюємо властивості п'єзоплівки CdS. Розрахунок починаємо з частот резонансу та антирезонансу і добротності. Ємність  $C$  розраховуємо за формулою :

$$C = \frac{1}{\omega_p R Q_m} \quad (26).$$

Ємність  $C^T$ , яку п'єзоелектрик має лише на низькій частоті (100 Гц) виражаємо з формули:

$$C = C^T \frac{(\omega_a^2 - \omega_p^2)}{\omega_a^2} \quad (27).$$

Для оцінки властивостей п'єзовластивостей широко застосовується його еквівалентна електрична схема (рис.12), що містить електричну ємність  $C_0$ , яка розраховується за формулою:

$$C^T = C_0 + C \quad (28).$$

Одним з параметрів, що характеризують п'єзоелементи в його еквівалентній схемі, є ефективний коефіцієнт електромеханічного зв'язку  $k_e$ :

$$k_e = \frac{C}{C^T} \quad (29),$$

та розраховуємо :

$$k_{31}^2 = \frac{\pi}{8} * \frac{\omega_a^2 - \omega_p^2}{\omega_a^2} \quad (30).$$

Для розрахунку п'єзомодулю  $d_{ij}^2 = \beta_{ij} * C$  робимо наступні припущення. Величину  $C$  беремо як  $C^T$ . Константа  $\beta_{ij}$  визначається розмірами п'єзоелементу і його пружною піддатливістю. Наприклад,

$$\beta_{31} = \frac{\pi^2}{8} * \frac{t}{l * w} * S_{11}^E \quad (31),$$

де  $\frac{t}{l * w}$  – геометрія зразка, його площу визначаємо за формулою:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \quad (32),$$

де визначений діаметр  $d = 5$  мкм. Далі умовно замінюємо  $\beta_{31}$  на діелектричну постійну  $\epsilon_{33}^T$ :

$$\epsilon_{33}^T = \frac{t}{l * w} * C^T \quad (33).$$

Паралельну індуктивність  $L$  розраховуємо з формули:

$$\omega_a^2 = \frac{1}{L} \left( \frac{1}{C} + \frac{1}{C_0} \right) \quad (34).$$

Отримані дані та розрахунки було занесено до таблиці 7.

					БР.171.061.003 ПЗ	Анк
						50
Змн	Анк	№ локум	Піппис	Дата		

Таблиця 7. Розраховані номінали коливального контуру п'єзоплівки

№	$\omega_p$	$\Delta\omega_p$	$Q_m$	$\omega_a$	$\Delta\omega_a$	$Q_{ma}$	$C$ , мкФ	$R$ , Ом	$C^T$ , мкФ	$C_0$ , мкФ	$K_e$	$K_{31}$	$\varepsilon_{33}^{T*}$ $10^{-5}$	$d_{ij}$ $10^{-5}$	$L$ , кГн
1	914	12	76,16	1001	52	19,3	0,14	1	0,86	0,72	0,17	0,453	4,34	2,5	83,5
2	969	13	74,5	1032	64	16,13	0,14	1	0,01	0,01	0,12	0,382	5,88	2,9	82
3	987	13	76	1187	131	9,06	0,13	0,9	0,43	0,3	0,30	0,617	2,17	1,7	10,8

Для вимірювання імпедансу і активних та реактивних складових у плівці CdS використовувався прилад «Измеритель иммитанса Е7-20» (рис. 13).

Вимірювач імітансу Е7-20 - прецизійний прилад класу точності 0,1 з широким діапазоном робочих частот 25 Гц - 1 МГц і високою швидкістю вимірювань до 25 вимірювань за секунду [20].

Використовується під час контролю якості електро- та радіоприладів, при ремонті апаратури, стандартизації параметрів мікроелектронної апаратури та напівпровідникових діодів. Також використовується для сертифікації засобів виміру і різних функціональних приладів.

Вимірювані параметри Е7-20:

- індуктивність ( $L_s, L_p$ ),
- ємність ( $C_s, C_p$ ),
- опір ( $R_s, R_p$ ),
- провідність ( $G_p$ ),
- фактор втрат ( $D$ ),
- добротність ( $Q$ ),
- модуль комплексного опору  $Z$ ,
- реактивний опір ( $X_s$ ),
- кут фазового зсуву,
- струм витоку ( $I$ )

Були виміряні індуктивності, значення яких показані на рисунку 14. Ми бачимо, що розраховані значення індуктивності і виміряні приблизно співпадають.

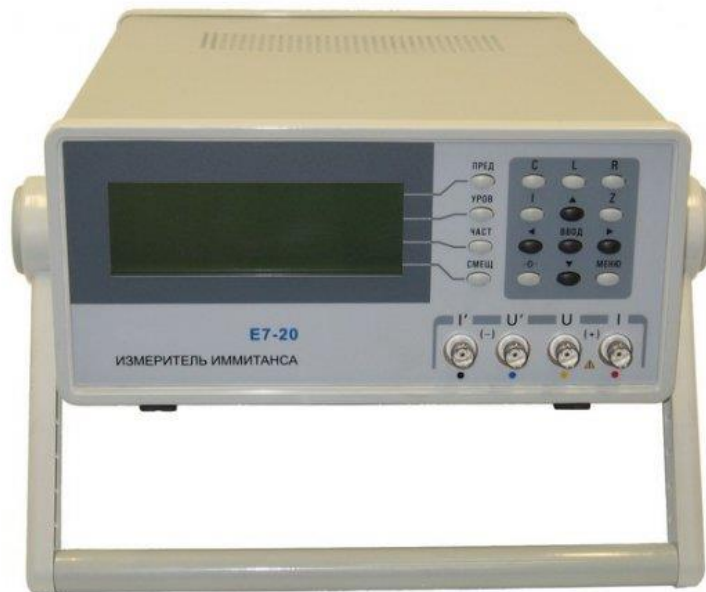


Рис. 13. «Измеритель иммитанса E7-20».

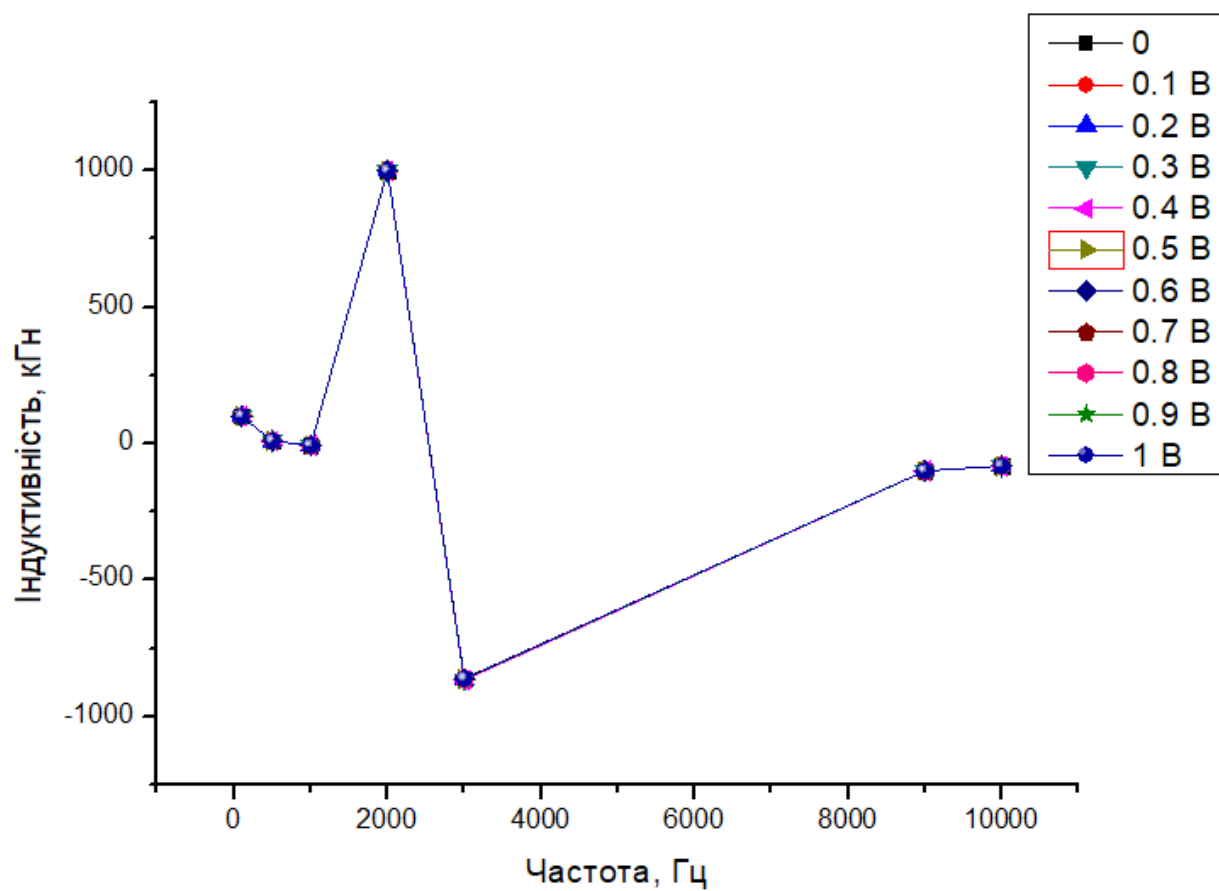


Рис.14. Результати виміру індуктивності за допомогою приладу «Измеритель иммитанса E7-20».

## Висновки:

Було підтверджено, що дані плівки мають наявність п'єзоефекту. З використанням амплітудно – частотної характеристики обчислено номінали коливального контуру, що були підтвердженні додатковими вимірами на приладі «Измеритель иммитанса Е7-20», що каже о перспективі використання даних плівок. За допомогою еквівалентної схеми можна дати точну оцінку п'єзовластивостям тонкої плівки. З електричною боку ПКЕ моделюється чисто електричною системою (еквівалентною електричною схемою), що підкоряється рівнянням такого ж виду, як і рівняння, описують поведінку п'єзоелектриків. Був обумовлений вибір розрахунку номіналів схеми за допомогою еквівалентної схеми. Власноруч розроблена методика вимірювання п'єзоелектричних плівок.

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.ум.	Підпис	Дата		54

## 5. Приклад застосування п'єзопретворювача з плівкою CdS у коаксіальних лініях навантаження.

Одним з можливих застосувань п'єзоплівки є коаксіальна лінія навантаження у ролі навантажувального елемента.

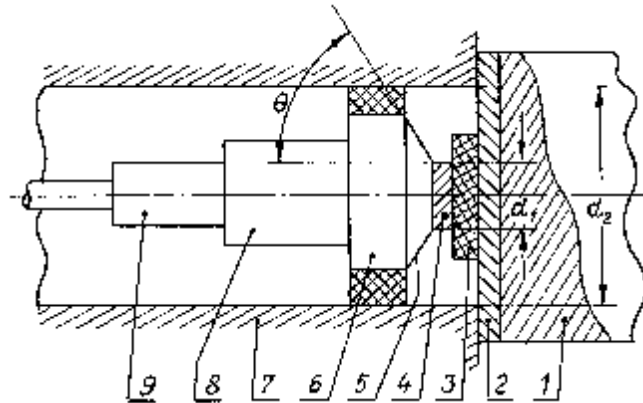


Рис. 15. Коаксіальна збуджуюча система.

Звукопровід 1 - кристал алюмінійтрієвого гранату (Y3Al5O12) прямокутного перерізу, орієнтований вздовж напрямку.

Він з послідовно нанесеними на його торець підкладкою 2, п'єзоелектриком 3 і надслоєм 4 притискається до торця коаксіальної лінії з внутрішнім провідником 6 і зовнішнім 7. Торцеві 5 провідника 6 і підкладка 2 утворюють відрізок кінцевої лінії з тим же хвильовим опором, що і коаксіальна. Для цього на торці є конус з кутом  $\theta$ , що визначається за формулою:

$$\theta = 2 \operatorname{arctg} \left( \exp \left( -\frac{Z_0}{60} \right) \right) \quad (35).$$

Так як на СВЧ імпеданс  $Z(\omega)$  зазвичай малий, то і зазначена лінія повинна мати низький хвильовий опір. Це викликає необхідність застосування трансформатора опорів для узгодження низькоомної лінії зі стандартною. Таким узгодженням може бути чебишовський ступінчастий перехід, представлений сходинками 8 і 9.

П'єзoeлемент, підключений до коаксіальної лінії, виявляється для неї навантаженням з опором

$$Z_H(\omega) = R(\omega) + R_{\Pi} - \frac{j}{\omega C_0} = \frac{\delta + \delta_{\Pi} - j}{\omega C_0} \quad (36),$$

де  $\delta_{\Pi}$ - безрозмірна величина, що характеризує втрати,

$$\delta_{\Pi} = R_{\Pi} \omega C_0 = R_{\Pi}(\beta h) \Phi \quad (37),$$

де  $\Phi$  - константа, яка визначається формулою  $\Phi = \varepsilon v_2 s / h^2$ . Якщо не враховувати втрати в самій коаксіальній лінії, то

$$\eta(\beta h) = \frac{4\delta\omega C_0 Z_0}{(\delta + \delta_{\Pi} + Z_0\omega C_0)^2 + 1} \quad (38),$$

де  $Z_0$  – при відсутності затухання у лінії є дійсним числом.

Величина  $\eta(\omega)$  досягає максимуму при наступному максимальному значенні  $Z_0$ :

$$Z_{0, \text{опт}} = \frac{\sqrt{(\delta + \delta_{\Pi})^2 + 1}}{\omega C_0} \quad (39).$$

Легко бачити, що величина  $Z_{0\text{опт}}$  дорівнює модулю імпедансу перетворювача, обчисленому з урахуванням втрат. Якщо вибрати лінію так, щоб на частоті  $\omega_0$  її хвильовий опір для даного п'єзoeлемента виявилось оптимальним, то для довільної частоти отримаємо:

$$\eta(\beta h) = \frac{4\beta h \delta \xi}{(\delta + \delta_{\Pi} + \beta h \xi)^2 + 1} \quad (40).$$

Використовуваний п'єзoeлемент складається з металевого підкладки і п'єзoeлектричної плівки, що покривають повністю весь торець звукопроводу [15]. Якщо притиснути останній до виходу збудливою системи, то вона виявляється навантаженою на два послідовно з'єднаних імпеданси. Перший з



них -  $Z_{\text{вну}}$  утворений п'єзоелектриком, укладеним між підкладкою і внутрішнім провідником, а другий -  $Z_{\text{зовн}}$  - між підкладкою і зовнішнім провідником .

Для того, щоб забезпечити надійне зіткнення п'єзоелемента з центральним провідником , в останньому просвердлений "глухий" отвір, в яку вставлена пружина і металевий стержень .

Для центрування звукопроводу на нього в середній частині щільно надіто дюралюмінієвого кільце з прямокутним отвором. Воно закріплюється в трубці за допомогою трьох гвинтів. Останні дозволяють домагатися повного торкання торця коаксіальної лінії поверхнею п'єзоелемента.

Заміна п'єзоелементу на основі п'єзокераміки або подібних обумовлено тим, що п'єзокераміка – діелектрик, таким чином затухання хвилі відбувається швидше. Щоб зменшити затухання у звукопроводі використовують 2 методи:

- зменшують об'єм п'єзоелементу;
- використання напівпровідника замість діелектрика (можемо змінювати провідність).

Зміна провідності дозволяє створювати конструкцію звукопроводу з бажаними характеристиками. Наприклад, значно зменшити затухання хвилі, яка проходить по звукопроводу. Тому ми можемо використати п'єзоплівку як заміну звичайному п'єзоелементу у цьому випадку.

П'єзоплівка має декілька переваг перед звичайними п'єзоелементами. Наприклад:

- менші затрати на енергію;
- менші габарити;
- можемо задати потрібну провідність;
- менш піддані механічним пошкодженням.

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ локум.	Піппис	Дата		57

## Висновки:

У даній главі була обумовлена заміна старого елемента у коаксіальній системі збудження на тонку п'єзоплівку, приведені її переваги перед використанням класичної технології. Показана робота коаксіальної системи збудження і роль даного зразка у повсякденній роботі приладу. Формули, що фігурують у розділі доказують те, що їх розрахунок ще раз підкреслює доцільність використання тонких плівок А2В6 типу.

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ док.ум.	Підпис	Дата		58

## Висновок

Розглянуто принцип п'єзоелектричного ефекту, матеріали, на яких проявляється п'єзоефект, виділено декілька груп п'єзоелектричних керамічних матеріалів та їх основні властивості, додана таблиця з параметрами найбільш популярних п'єзокерамічних матеріалів. В роботі проаналізовані п'єзоелектричні плівки та їх основні переваги у порівнянні з п'єзокерамікою (наприклад, низький імпеданс), приведені основні властивості тонких п'єзоелектричних плівок та доцільність їх використання на прикладі найбільш великих груп п'єзодатчиків. Розглянуто методи дослідження п'єзоелектричних датчиків та їх основні рівняння, які також доцільні для п'єзоелектричних тонких плівок. Проаналізовано методи підвищення чутливості п'єзоелектричних датчиків та приведені основні співвідношення для їх реалізації. Також, у даній роботі показана методика та чіткі інструкції з виготовлення плівок А2В6 типу, конкретні матеріали, обладнання та рекомендації, щодо їх виготовлення в певних умовах. Показаний температурний графік, який супроводжує увесь процес виготовлення тонкої плівки CdS. Значну частину роботи займає огляд приладів для вимірювання характеристик плівок та їх використання. Була власноруч розроблена та описана методика для вимірювання характеристик та властивостей п'єзоплівок, яка у результаті показала, що дані плівки мають наявність п'єзоефекту. Розробка методу вимірювання значно скоротить час для підтвердження п'єзоефекту та доцільність використання даного екземпляру у певних умовах. В роботі також показано приклад використання тонкої п'єзоплівки у коаксіальній збуджуючій системі, що свідчить про те, що її перспективність використання веде до зменшення габаритів, скороченню витрат на виготовлення та, найважливіше, отримання потрібних нам характеристик при менших затратах на енергію.

					БР.171.061.003 ПЗ	Апк
Змн	Апк	№ локум.	Пілпис	Дата		59

## Перелік використаної науково-технічної літератури:

1. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука, Москва: Техносфера, 2012.- 624 с., ISBN 978-5-94836-316-5.
2. Фрайден Дж. Современные датчики: Справочник. — М.: Техносфера, 2005. — 592 с
3. Пьезоэлектрическая керамика./ [Яффе Б., Кук У., Яффе Г. ] — М.: Мир, 1974. — 289 с.
4. Goldade Victor. Полупроводниковые соединения группы AIIIVI. [Электронный ресурс] : Полупроводниковые материалы и технология их получения. // Томский Политехнический Университет — Глава 12 — 184 Кб —2004.
5. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. — Москва: Техносфера, 2006. — 632 с.
6. Шульга Н.А., Болкисев А.М. Колебания пьезоэлектрических тел. — Киев: Наукова думка, 1990. — 228 с.
7. Магнитные и диэлектрические приборы/ Под. ред. Г. Катца. — М.: Энергия, 1964. — 416 с
8. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы (элементы теории, методы расчета и справочный материал). — М.: Машиностроение, 1977. — 464 с.
9. Ю. А. Зюрюкин, В. И. Наянов, В. А. Полотнягин. К теории возбуждения гиперзвуковых волн пьезоэлектрическими преобразователями (тонкопленочные преобразователи). // Радиотехника и электроника, 1970. Т.15. № 5. С. 1059-1067.
10. М. А. Григорьев. Пьезоэлектрический преобразователь СВЧ электромагнитных колебаний в объемные акустические волны.

					БР.171.061.003 ПЗ	Анк
						60
Змн	Анк	№ док-м.	Підпис	Дата		

11. С.Ю. Павелець, Ю.М. Бобренко, Т.В. Семікіна, Б.С. Атдаєв, Г.Г. Шереметова, М.В. Ярошенко. Сенсори ультрафіолетового випромінювання на основі твердих розчинів  $ZnxCd_{1-x}S$ . Полупроводники 43, 801 (2009)
12. Технічна документація «Измеритель комплексных коэффициентов передачи и отражения ОБЗОР-103», dīraul.ru, Санкт-Петербург.
13. Земляков В.Л., Петин Г.П. О Расчете параметров эквивалентной электрической схемы пьезоэлектрического элемента.// Актуальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения. Ростов н/Д: изд-во «ЦВВР», 2006, с.
14. Пьезокерамические преобразователи: Справочник / под ред. С.И. Пугачева. Л.: Судостроение, 1984. 356с.
15. Земляков В.Л., Ключников С.Н. Определение параметров пьезокерамических элементов по амплитудным измерениям. //Измерительная техника, 2010, N° 3, с. 38–40.
16. Земляков В.Л., Земляков В.В Новый подход к измерению пьезомодуля пьезокерамических материалов в динамическом режиме. // Измерительная техника, 2002, № 4, с. 52–55.
17. Ю. А. Зюрюкин, В. И. Наянов, В. А. Полотнягин. К теории возбуждения гиперзвуковых волн пьезоэлектрическими преобразователями (тонкопленочные преобразователи). // Радиотехника и электроника, 1970. Т.15. № 5. С. 1059-1067.
18. Земляков В.Л. Методы и средства измерений в пьезоэлектрическом приборостроении: монография / В.Л.Земляков. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2009. – 180 с. (Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 5.)

19. Земляков В.Л., Ключников С.Н. Определение параметров пьезокерамических элементов по амплитудным измерениям. //Измерительная техника, 2010, № 3, с. 38–40.

20. Технічна документація «Измеритель иммитанса Е7-20. Руководство по эксплуатации» УШЯИ.411218.012 РЭ

					БР.171.061.003 ПЗ	Арк
						62
Змн	Арк	№ док.м.	Підпис	Дата		